



Modos y mecanismos de falla de LEDs empleados en iluminación

Failure modes and failure mechanisms of LEDs used in lighting

Diego de los Ángeles Fernández Labrada^{1,*}, Ernesto Alejandro Guerra Blanco¹, Miguel Castro Fernández¹, Alexander Céspedes Fernández^{II}

^I Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría, La Habana, Cuba

^{II} Universidad del Valle, Cali, Valle del Cauca, Colombia

*Autor de correspondencia: dfernandez@electronica.cujae.edu.cu

Recibido: 4 de abril de 2022

Aprobado: 25 de junio de 2022

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

Debido al incremento del uso de los LEDs en los sistemas de iluminación, la evaluación de la confiabilidad de estos, constituye un tema de vital importancia en el sector de la iluminación, y por consiguiente, la comprensión de sus mecanismos y modos de falla también lo es. Aunque el proceso de construcción de los LEDs es similar a otros dispositivos microelectrónicos existen materiales y requisitos funcionales en estos que hacen que sus modos y mecanismos de fallo sean diferentes. En este trabajo se presenta una revisión de las investigaciones realizadas sobre los mecanismos y modos de falla de los LEDs empleados en los sistemas de iluminación. Este artículo proporciona una base para comprender los problemas de confiabilidad de los LEDs, pues aún la información sobre confiabilidad proporcionada por los fabricantes de LEDs no es suficiente para los usuarios de esta tecnología.

Palabras clave: LEDs empleados en iluminación, Evaluación de confiabilidad, Mecanismos de falla, Modos de falla, Fuentes de iluminación

Due to the increasing use of LEDs in lighting systems, the LEDs reliability evaluation is a vitally important issue in the lighting industry, and consequently, the understanding of their failure mechanisms and failure modes are also. Although the construction process of LEDs is similar to other microelectronic devices, there are materials and functional requirements that make their failure modes and mechanisms different. This paper presents a review of research on the failure mechanisms and failure modes of LEDs used in lighting systems. This paper provides a basis for understanding the reliability issues of LEDs, as even the reliability information provided by LED manufacturers is not sufficient for users of this technology.

Key words: LEDs used in lighting, Reliability assessment, Failure mechanisms, Failure modes, Lighting sources.

INTRODUCCIÓN

Las últimas generaciones de LEDs como fuentes de iluminación, en relación a las tecnologías tradicionales, ofrecen una gran variedad de ventajas [1–5], como alta luminosidad [6], gran eficacia [7], tiempo de vida superior a 50 mil horas [8], menor disipación de energía, encendido instantáneo, ausencia de contenido de mercurio, mayor resistencia a las vibraciones, dimensiones reducidas [1], entre otras. Por dichas razones, el empleo de LEDs en los sistemas de iluminación ha crecido significativamente en los últimos años [4], y seguirá creciendo en los próximos [9, 10]; por ejemplo, según reporte del Departamento de Energía de Estados Unidos, se espera que esta tecnología abarque el 72% del mercado de la iluminación general para el 2025 y el 84% para el 2030 [11]. Con el incremento del uso de los LEDs en los sistemas de iluminación, la evaluación de la confiabilidad de estos, constituye un tema de vital importancia en el sector de la iluminación [5, 12–14], y por consiguiente, también lo es, la comprensión de sus mecanismos y modos de falla; este tema resulta clave en el campo de la iluminación de estado sólido, pues la relación mecanismo- modo de falla en los LEDs es muy compleja [15] y además, porque debido a la permanente introducción de nuevos procesos y materiales en la industria de la iluminación basada en LEDs, modos de falla desconocidos están apareciendo [16].

Cómo citar este artículo:

Diego de los Ángeles Fernández Labrada, *et al.* Modos y mecanismos de falla de LEDs empleados en iluminación.

Ingeniería Energética, 2022, 43(3), septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

En este trabajo se abordan cuestiones fundamentales e imprescindibles en la evaluación de la confiabilidad de LEDs empleados en iluminación, tales como: los mecanismos y modos de falla de los LEDs, los indicadores de rendimiento y los criterios de fallo.

DESARROLLO

Modos y mecanismos de falla de los LEDs

Las estructuras de los encapsulados de los LEDs pueden ser diferentes, dependiendo de los tipos de encapsulados [17]. En general, el encapsulado de un LED está compuesto de un diodo semiconductor (*chip*), lente, encapsulante o material de encapsulado, capas de fósforo, hilo conductor (*wire bond*) y sustrato [9]. A modo de ejemplo, la figura 1, muestra un tipo de encapsulado de LEDs. En cada uno de los elementos de un LED (encapsulado) pueden ocurrir mecanismos de falla [15, 18].

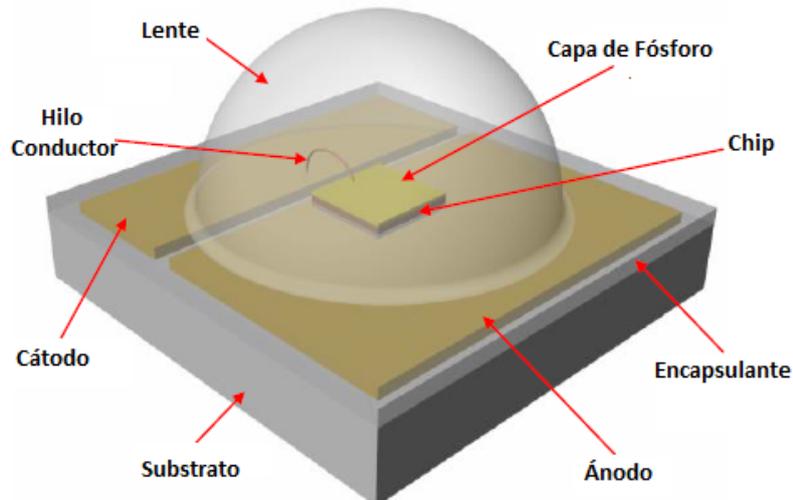


Fig. 1. Estructura de un tipo de encapsulado de un LED (*Cree XLamp*). Fuente: [19]

En la literatura se plantea que en los LEDs se presentan fallas catastróficas y fallas por degradación [20]. Las fallas catastróficas se definen como una pérdida total de la funcionalidad del dispositivo, en el caso de los LEDs se refiere a los modos de falla por circuito abierto o cortocircuito [7]. Las fallas por degradación se refieren a la degradación de algún indicador de desempeño como, por ejemplo, la pérdida del flujo luminoso [12], o el cambio de las coordenadas de cromaticidad. Los modos de fallas por degradación son los más comunes.

Los mecanismos de falla de los LEDs se dividen en tres categorías, basadas estas en los sitios de la falla: diodo semiconductor, interconexión (hilo conductor) y encapsulado (lente, capas de fósforo, sustrato y encapsulante) [19]. Los mecanismos de falla relacionados con el diodo semiconductor incluyen los defectos debido a la presencia de dislocaciones en la red cristalina, fractura, difusión de dopantes y electromigración. Los mecanismos de falla relacionados con la interconexión son: la fractura del hilo conductor, inducida por sobrecarga eléctrica y fatiga; la interdifusión metalúrgica del contacto eléctrico, y las descargas electrostáticas [21]. Los mecanismos de falla de los LEDs relacionados con el encapsulado incluyen carbonización del encapsulante, delaminación, amarillamiento del encapsulante y/o lente, agrietamiento del lente, desactivación fluorescente del fósforo y fatiga de la soldadura del hilo conductor. A dichos mecanismos de falla están asociados varios modos de falla [19], [20]. La relación entre dichos modos y mecanismos de falla se muestra en la tabla 1, la cual constituye una versión de la tabla mostradas en [19].

Para desarrollar y/o aplicar un método para la predicción de confiabilidad y el tiempo de vida de LEDs de alta potencia empleados en iluminación, resulta imprescindible comprender los distintos mecanismos de falla y conocer el papel que juegan en cada uno de los modos de falla [15]. A continuación, se explican brevemente los mecanismos de falla relacionados en la tabla 1.

Generación y movimiento de defectos y dislocaciones en la red cristalina

Los defectos como las dislocaciones, introducidos durante el crecimiento del cristal del semiconductor, pueden actuar como centros de recombinación no radiativa, lo cual reduce la eficiencia cuántica interna del LED, y, por consiguiente, disminuye el flujo luminoso del dispositivo.

Además, esta recombinación no radiativa causa la formación de nuevos defectos, los cuales también pueden actuar como centros de recombinación no radiativa o trayectorias de la corriente túnel; es decir, la alta densidad de defectos cristalinos provoca una reducción de la eficiencia cuántica interna debido al aumento de la tasa de recombinación no radiativa a través de centros de recombinación no radiativa y de la corriente de fuga inversa a través de trayectorias de tunelización [24]. Por otra parte, el aumento de la corriente de fuga inversa provoca variaciones en los parámetros eléctricos como un aumento del factor de idealidad del diodo y un aumento de la resistencia parásita en serie.

Tabla 1. Modos y mecanismos de falla de LEDs empleados en iluminación

Sitio de la Falla	Modo de Falla	Mecanismo de Falla
Diodo semiconductor	Degradación del flujo luminoso [22], incremento de la corriente de fuga inversa, incremento de la resistencia en serie parásita	Generación y movimiento de defectos y dislocaciones en la red cristalina
	Degradación del flujo luminoso	Fractura en el diodo semiconductor
	Degradación del flujo luminoso, aumento de la resistencia en serie y de la corriente directa	Difusión de dopantes
Interconexión	Ausencia de luz, cortocircuito	Electromigración
	Ausencia de luz, circuito abierto	Fractura del hilo conductor inducida por sobrecarga eléctrica y fatiga
	Degradación del flujo luminoso, incremento de la resistencia en serie parásita, cortocircuito	Interdifusión metalúrgica del contacto eléctrico
	Ausencia de luz, circuito abierto	Descarga Electrostática
Encapsulado	Degradación del flujo luminoso	Carbonización del Encapsulante y/o lente
	Degradación del flujo luminoso	Delaminación
	Degradación del flujo luminoso, cambio de color	Amarillamiento del Encapsulante y/o lente
	Degradación del flujo luminoso	Agrietamiento en la lente
	Degradación del flujo luminoso, cambio de color [6], [23]	Desactivación fluorescente del fósforo
	Degradación del flujo luminoso, incremento de la tensión directa	Fatiga de la unión de soldadura

Fractura en el diodo semiconductor

Este mecanismo de falla puede originarse cuando ocurren choques térmicos extremos en el semiconductor. Debido a los valores diferentes de coeficiente de expansión térmica de los distintos materiales que componen el LED, este puede estar sometido bajo estrés mecánico cuando las corrientes que lo atraviesan son elevadas y se produce el Efecto Joule, o cuando la temperatura ambiente es alta [25]. Además, los defectos que pueden generarse durante la construcción del diodo semiconductor como las diminutas fisuras causadas por deficiencias en el aserrado y/o el pulido, pueden acelerar la fractura en el semiconductor [6, 21, 26].

Difusión de dopantes

Con el objetivo de mejorar la conductividad de tipo p, el magnesio (Mg) se ha utilizado habitualmente como dopante aceptor para los nitruros de los grupos III y V. Sin embargo, durante el crecimiento de la capa p-GaN el Mg se difunde a los pozos cuánticos, lo que puede resultar en una disminución de la eficiencia de emisión de los pozos cuánticos múltiples, pues el Mg puede actuar como centro de recombinación no radiativa, por lo que se reduce la eficiencia cuántica interna y por consiguiente, el flujo luminoso del semiconductor. Además, la difusión de dopantes que actúan como centro de recombinación no radiativa produce un aumento de la resistencia en serie y/o de la tensión directa, que va acompañado de un aumento de los efectos de aglomeración de corriente, y un aumento de la corriente directa del diodo. Este mecanismo de falla se acelera con valores altos de temperatura y corriente [21, 26].

Electromigración

La electromigración es la migración de materiales causadas por un campo eléctrico. Su causa principal es una fuerza generada por la transferencia de cantidad de movimiento entre los electrones de conducción y los átomos del metal en la red cristalina. Dicha fuerza actúa en la dirección del flujo de corriente. Si la fuerza resultante en la dirección del viento de electrones supera la energía de activación, se inicia un proceso de difusión dirigida [27]. En el caso de los LEDs, este mecanismo de falla es el movimiento inducido eléctricamente de los átomos de metal en el contacto eléctrico con la superficie del semiconductor debido al intercambio de momento lineal con los electrones. Los factores determinantes para que se produzca la electromigración son valores elevados de la densidad de corriente y la temperatura.

Fractura del hilo conductor inducido por sobrecarga eléctrica y fatiga

Cuando los encapsulados de los LEDs se exponen a elevadas corrientes, el hilo conductor se comporta como un fusible, es decir, un sobreesfuerzo eléctrico puede provocar su fractura. La fractura del hilo conductor puede ocurrir también por fatiga térmica, la cual se induce normalmente a temperaturas elevadas debido a tensiones térmicas fluctuantes, producidas por variaciones de temperatura y por la diferencia de los coeficientes térmicos de expansión entre el metal del hilo conductor y los materiales del semiconductor o el encapsulante/ lente. Además, la fractura del hilo conductor puede producirse si el encapsulado del LED es expuesto durante un tiempo prolongado a un ambiente con altos valores de humedad; pues, si la cantidad de moléculas de agua absorbidas dentro del encapsulante epóxico es suficiente para producir corrosión, dicho proceso de destrucción puede contribuir a la fatiga del metal del hilo conductor [28].

Interdifusión metalúrgica del contacto eléctrico

La interdifusión metalúrgica por contacto eléctrico es causada por la interdifusión metal-metal y metal-semiconductor activadas a altas temperaturas y altas corrientes. La interdifusión metalúrgica de los contactos eléctricos difiere de la electromigración en el sentido de que el contacto eléctrico se degrada debido a la difusión externa y la difusión interna del contacto eléctrico. La interdifusión metalúrgica continua que implica la degradación de los contactos eléctricos da lugar a la aleación y la mezcla de los metales del contacto.

Descarga Electrostática

La descarga electrostática puede producir un circuito abierto en los LEDs debido al calentamiento local causado por la corriente de descarga que fluye en el dispositivo, y/o por la ruptura del dispositivo causada por el campo eléctrico. Los materiales primarios en los dispositivos semiconductores pueden, por naturaleza, soportar muy bien el calor, pero debido a la miniaturización de los dispositivos, la densidad de la corriente de descarga es tan alta que se produce la fusión y la ruptura dieléctrica. Generalmente, cuando el LED tiene polarización directa (pulsos de 1 ns a 1 μ s), no se produce el fallo, pero un impulso de polarización inversa provoca una descarga electrostática [29].

Carbonización del Encapsulante y/o lente

En la literatura se reporta que este mecanismo de falla se produce principalmente debido a elevadas temperaturas ambientales y al calentamiento por Efecto Joule [12, 30]. La carbonización del encapsulante y/o lente disminuye significativamente la capacidad de aislamiento eléctrico de este. La pérdida de la capacidad de aislamiento, en combinación con temperaturas superiores al umbral de temperatura ambiente para los materiales del encapsulado, puede iniciar un proceso de fuga térmica, lo cual acelera más la carbonización del encapsulante y/o lente [12].

Delaminación

En el sector de la microelectrónica, la delaminación es un mecanismo de falla clave que desencadena muchos problemas de confiabilidad, el cual se debe principalmente al desajuste entre las diferentes propiedades de los materiales, como el coeficiente de expansión térmica (CTE, por sus siglas en inglés), el coeficiente de expansión por humedad (CME, por sus siglas en inglés) y la expansión inducida por la presión de vapor. En el caso de los LEDs, el estrés térmico y la humedad absorbida por estos, pueden hacer que las capas de los distintos materiales de las capas de los encapsulados se separen, provocando una pérdida significativa de la resistencia mecánica; esto causa delaminación, la cual puede ocurrir entre el semiconductor o la capa del fósforo y la lente/encapsulante, el semiconductor y la capa de fósforo, y entre el chip y la capa de fijación del semiconductor.

Cuando se produce una delaminación entre el semiconductor y el fósforo, o entre el semiconductor y la lente/encapsulante, se reducirá la salida de luz, por lo que el flujo luminoso disminuirá. Por otra parte, cuando el mencionado mecanismo de falla se origina en la interconexión térmica, la resistencia térmica aumentará y, por tanto, la temperatura de unión (Temperatura del diodo semiconductor dentro del encapsulado del LED). Un incremento de la temperatura de unión puede ser la causa de otros mecanismos de falla como el amarillamiento del encapsulante y/o lente [31].

Amarillamiento del encapsulante y/o lente

Los materiales poliméricos (resinas epoxídicas y silicona) usados en los encapsulantes / lentes de los LEDs se degradan [32] y, por consiguiente, conducen al amarillamiento del encapsulado producto de:

- Decoloración debido a la temperatura de unión y a la temperatura ambiente. La decoloración se produce debido a la temperatura del punto de unión del termopar en el encapsulado (T_s) que se alcanza, la cual, depende de la temperatura ambiente (T_{amb}) y de la corriente que circula por el dispositivo [6, 20, 30, 33].
- Decoloración debida a radiación de onda corta (300 nm). Los materiales poliméricos se degradan con la luz ultravioleta; también se ha demostrado que la luz visible de menor longitud de onda, en el rango de 400-500 nm, produce este efecto [34]. La causa básica de la decoloración es la exposición prolongada a la emisión de longitud de onda corta (radiación azul o ultravioleta), que causa fotodegradación, y temperatura de unión, excesiva.
- Decoloración debida a la difusión de fósforo. Este mecanismo se produce por el paso del fósforo de la capa correspondiente del diodo semiconductor al material del encapsulado y se presenta principalmente en los LEDs blancos. El fósforo está incrustado dentro de una resina epoxi que rodea el diodo semiconductor. Cuando el fósforo está en contacto directo con este, el 60% de la emisión de fósforo se absorbe directamente hacia el mismo. Cuando el fósforo no está en contacto con el diodo semiconductor, sino lejos de él, la pérdida se debe principalmente a la absorción por las superficies reflectantes y a la luz atrapada dentro del fósforo difuso [35]. Un encapsulado con menor concentración y mayor espesor de fósforo tiene una mayor eficacia luminosa porque la eficiencia de extracción de luz es menor con bajas concentraciones de fósforo [36]. Se han realizado muchas investigaciones que relacionan diferentes distribuciones espaciales de fósforo con la confiabilidad. En [31] los autores analizaron el impacto de la dependencia de la temperatura, en la estabilidad de la temperatura de color correlacionada (CCT, por sus siglas en inglés) en los LEDs.

Si se analizan en conjunto las causas del amarillamiento del encapsulante y/o la lente, puede apreciarse que altos valores de T_s y de la corriente a través del LED, son los parámetros de mayor importancia en dicho mecanismo de falla. Debe considerarse también que algunas investigaciones han demostrado que el efecto térmico tiene mayor influencia sobre el amarillamiento que la radiación de longitud de onda corta [34]. Además, en [37] los autores encontraron que el amarillamiento no se ve afectado significativamente por una prueba de alta humedad. Esta última observación implica que los datos necesarios para analizar, considerar o estudiar el amarillamiento del encapsulante y/o la lente se pueden tomar según los métodos establecidos por la norma IES LM-80-20, en la cual, el requisito de humedad ambiental no es estricto (siempre y cuando no sea más del 65%) [38].

Agrietamiento en la lente

El agrietamiento en las lentes depende de las propiedades de sus materiales como las resinas epoxi, los polímeros de silicona y el polimetilmetacrilato. Este mecanismo de falla se produce debido a estrés termomecánico y/o estrés higromecánico, y a procedimientos inadecuados durante el montaje de la tarjeta de circuito impreso. Cuando los LEDs se someten a elevadas temperaturas, pueden introducirse una serie de grietas en la superficie de la lente y en el interior del encapsulado de polímero debido a la expansión térmica. Además, variaciones de temperatura en los LEDs inducen estrés mecánico, por lo que la lente puede agrietarse por choque térmico. También, la exposición prolongada a una elevada humedad puede provocar el enturbiamiento de las lentes de epoxi [32, 39].

Las causas de agrietamiento, mencionadas anteriormente, evidencian el papel protagónico e imprescindible de la selección de los materiales para la construcción de la lente y de un diseño en función de mitigar los efectos de los estreses termomecánicos e higromecánicos; así como la importancia del análisis de la confiabilidad [12, 33].

Desactivación fluorescente del fósforo

La desactivación fluorescente es uno de los parámetros tecnológicos importantes para los fósforos utilizados en los LEDs blancos [36, 40]. La desactivación fluorescente del fósforo induce a una disminución de la producción de luz, y al cambio de color. Con el aumento de la temperatura, la probabilidad de transición no radiativa por activación térmica, y la liberación de núcleos de emisión aumenta, por lo que se desactiva la luminiscencia. La interacción electrón- fonón se intensifica a alta temperatura como resultado del aumento de la densidad de población del fonón, que amplía la “anchura a media altura” de la anchura espectral [19]. En la literatura se encontraron trabajos que plantean una notable degradación del fósforo, cuando la exposición a pruebas de estrés de larga duración se presenta a niveles de temperatura moderados/altos.

La degradación consiste principalmente en una disminución de la eficiencia de la conversión y en el empeoramiento de las propiedades cromáticas del sistema de LEDs-fósforo [31, 41].

Como consecuencia, las propiedades cromáticas de los sistemas de LEDs-fósforo pueden estar significativamente comprometidas a las temperaturas de estrés más altas [23, 42, 43]: la CCT puede mostrar una notable disminución. Por otro lado, en [44] los autores detectaron degradación del fósforo para encapsulados LEDs envejecidos en condiciones de alta humedad.

Fatiga de la unión de soldadura

Los encapsulados de LEDs de alta potencia se adhieren generalmente a una placa de circuito impreso de cerámica mediante una soldadura, en la cual, puede producirse fatiga [45]. Aunque las cargas cíclicas que originan fatiga en la unión de soldadura pueden adoptar varias formas, (como fluctuaciones de temperatura, vibraciones mecánicas o cargas mecánicas), en el caso de los LEDs, la mayor parte es de origen termomecánico.

Durante las oscilaciones de temperatura, se generan tensiones en la soldadura debido a las diferencias del coeficiente de expansión térmica entre la placa de circuito impreso y el LED, por lo que las uniones de soldadura pueden experimentar una deformación no recuperable que se acumula y conduce a la degradación y eventual fractura.

Además de la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica del LED y la placa de circuito impreso, las causas más frecuentes de Fatiga de las uniones de soldadura son la geometría del encapsulado, las propiedades del material y el espesor de la unión de soldadura, y espesor y resistencia térmica del dieléctrico de la placa [25].

Indicadores de rendimiento y criterios de fallo de los LEDs

Los indicadores de rendimiento, también llamados parámetros característicos, tales como el LM, la distribución de potencia espectral, las coordenadas de color (x, y), las coordenadas de cromaticidad (u', v'), el cambio de las coordenadas de cromaticidad $\Delta u'v'$, la corriente y tensión en polarización directa y la corriente inversa de saturación, pueden emplearse para establecer los criterios de fallo [23, 43], [46–49]; los criterios de fallo para la degradación del flujo luminoso, y empleados por la ASSIST, son el LM al 50% (criterio L50) para la iluminación decorativa y al 70% (criterio L70) para la iluminación general [38]. Los criterios para el mantenimiento del color aún no están bien definidos en el sector de la iluminación [50], excepto por el programa Energy Star del Departamento de Energía de Estados Unidos, el cual establece que el cambio de las coordenadas de cromaticidad a lo largo de la vida del LED debe ser inferior a 0,007 en el diagrama CIE 1976 (u', v'); es decir $\Delta u'v' < 0,007$, siendo $\Delta u'v'$ la distancia euclidiana (ED por sus siglas en inglés) entre las coordenadas de cromaticidad del punto inicial y el punto en análisis [46].

CONCLUSIONES

El estrés termomecánico e higromecánico y la sobrecarga eléctrica son las causas fundamentales de la activación de los mecanismos de falla que pueden resultar en una o varias fallas; en el caso de los LEDs las más comunes son las fallas por degradación. Los modos de falla más importantes en los LEDs son la degradación del flujo luminoso y el cambio de color. En el proceso de construcción de los LEDs los fabricantes deben controlar el agrietamiento del diodo semiconductor mediante el ajuste de los coeficientes de expansión térmica entre el sustrato y las capas epitaxiales. La evaluación de la confiabilidad de los LEDs debe incluir un conocimiento profundo de las distintas variables durante el proceso de construcción y de los entornos asociados que son críticos para la calidad de los LEDs. Aún es necesario mejorar el diseño estructural y de materiales del diodo semiconductor del LED y la gestión térmica interna que maneja la resistencia térmica desde la unión hasta el encapsulado. Además, resulta imprescindible una apropiada selección de los materiales de las lentes para minimizar los estreses termomecánico e higromecánico. Para mitigar los efectos de la electromigración se requiere una gestión térmica adecuada y diseños de encapsulados innovadores. La determinación de las condiciones de ensayo de envejecimiento mejor diseñadas con la cualificación basada en la física de los fallos permite una mayor representación de las condiciones de uso final de los LEDs. Es necesario que los organismos de normalización térmica, eléctrica y óptica y las sociedades profesionales cooperen para llegar a unas normas térmicas aceptadas a nivel mundial para el establecimiento de los criterios de falla para el cambio de color.

REFERENCIAS

- [1] Li J., *et al.* "Basic Principles of LED", en *III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications*, 2020, vol. 306, p. 7-18. doi: 10.1007/978-981-15-7949-3_2. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7949-3_2
- [2] Li J., *et al.* "Introduction", en *III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications*, 2020, vol. 306, p. 1-5. doi: 10.1007/978-981-15-7949-3_1. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7949-3_1
- [3] Li J., *et al.* "Applications of LEDs", en *III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications*, 2020, p. 229-251. doi: 10.1007/978-981-15-7949-3_11. Disponible en: <https://www.springerprofessional.de/en/applications-of-leds/18335080>
- [4] Vos T., P. den Breeijen, y W. D. van Driel, "Quality and Reliability in Solid-State Lighting: Qua Vadis?", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 1-13. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_1. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58175-0_1

- [5] Li J., *et al.*, "Reliability Analysis of Group III Nitride LEDs Devices", en *III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications*, 2020, p. 203-227. doi: 10.1007/978-981-15-7949-3_10. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7949-3_10
- [6] Zhuang Y., *et al.* "Study on the mechanism of color coordinate shift of LED package", *J. Semicond.*, vol. 38, n. 7, p. 074006, jul. 2017, doi: 10.1088/1674-4926/38/7/074006. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4926/38/7/074006/meta>
- [7] Hamon B., T. Merelle, y B. Bataillou, "LED Early Failures: Detection, Signature, and Related Mechanisms", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 49-75. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_3. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-58175-0?noAccess=true>
- [8] Juárez M. A., *et al.* "Study of Light Degradation in High Power LEDs as a Function of the Feeding Wavefor", en *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, nov. 2020, vol. 4, p. 1-6. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9258706>
- [9] Baillot R., and Yannick Deshayes. "Reliability Investigation of LED Devices for Public Light Applications". 1st Edition. ISTE Press Ltd, 2017. [Consultado el 27 de junio de 2022]. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/reliability-investigation-of-led-devices-for-public-light-applications/baillot/978-1-78548-149-9>
- [10] Königs S., S. Mayr, y A. Buchner. "LED-based light sources optimised for high colour rendition from an end users' perspective". *Ergonomics*, vol. 64, n. 5, p. 671-683, may 2021. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140139.2020.1858187?journalCode=terg20>
- [11] U.S. Department of Energy, "SSL Forecast Report", *Energy.gov*, 2017. [Consultado el 3 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/ssl/ssl-forecast-report>
- [12] Mehr M. Yazdan, W. D. van Driel, y G. Q. Zhang, "Reliability and Lifetime Assessment of Optical Materials in LED-Based Products", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 115-139. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_5. Disponible en: <https://research.tudelft.nl/en/publications/reliability-and-lifetime-assessment-of-optical-materials-in-led-b>
- [13] Zhang S.-U., "Long-Term Reliability Prediction of LED Packages Using Numerical Simulation", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 503-525. Disponible en: <https://www.springerprofessional.de/long-term-reliability-prediction-of-led-packages-using-numerical/13299114>
- [14] Qian C., *et al.* "Advances in Reliability Testing and Standards Development for LED Packages and Systems", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 77-114. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_4. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58175-0_4
- [15] Guang L. Guo, L. Gan-xiong, y Y. Bin, "Prognostics and Health Management Technology of LED Lamp", en *2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, ago. 2018, p. 1273-1277. doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480509. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8480509>
- [16] Li J., *et al.*, "III-Nitride LED Chip Fabrication Techniques", en *III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications*, 2020, p. 151-183. doi: 10.1007/978-981-15-7949-3_8. Disponible en: <https://www.springerprofessional.de/en/iii-nitride-led-chip-fabrication-techniques/18335096>
- [17] Li J., *et al.*, "Packaging of Group-III Nitride LED", en *III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications*, cap. 9, 2020, p. 185-202. doi: 10.1007/978-981-15-7949-3_9. Disponible en: https://books.google.com/cu/books?id=Snn6DwAAQBAJ&pg=PA185&lpg=PA185&dq=doi:+10.1007/978-981-15-7949-3_9&source=bl&ots=Yp7jtiAZ5K&sig=ACfU3U1aslVPT97y2-mbtqoEGk2FtJnLfg&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewiBysO-ttD4AhXtkWoFHxVECLgQ6AF6BAgCEAM#v=onepage&q=doi%3A%2010.1007%2F978-981-15-7949-3_9&f=false
- [18] Fan J., *et al.* "Fault Diagnostics and Lifetime Prognostics for Phosphor-Converted White LED Packages", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 255-299. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_11. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58175-0_11
- [19] Sun B., *et al.* "A Review of Prognostic Techniques for High-Power White LEDs", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, n. 8, p. 6338-6362, ago. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2618422. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7593385>
- [20] Iqbal F., S. Kim, y H. Kim, "Degradation of phosphor-in-glass encapsulants with various phosphor types for high power LEDs", *Optical Materials*, vol. 72, p. 323-329, oct. 2017, doi: 10.1016/j.optmat.2017.06.024. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925346717304020>
- [21] De Santi C., *et al.* "Chip-Level Degradation of InGaN-Based Optoelectronic Devices", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 15-48. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_2. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58175-0_2
- [22] Ibrahim M. S., *et al.* "Lumen Degradation Lifetime Prediction for High-Power White LEDs Based on the Gamma Process Model", *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, n. 6, p. 1-16, dic. 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2950472. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8887259>

- [23] Van Driel W. D., *et al.* "Color maintenance prediction for LED-based products», en *2018 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, abr. 2018, p. 1-6. doi: 10.1109/EuroSimE.2018.8369875. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8369875>
- [24] Meneghesso G., M. Meneghini, y E. Zanoni, "Recent results on the degradation of white LEDs for lighting", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 43, n. 35, p. 354007, ago. 2010, doi: 10.1088/0022-3727/43/35/354007. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/43/35/354007>
- [25] Zhang J. y G. Q. Zhang, "Advances in LED Solder Joint Reliability Testing and Prediction", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 301-351. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_12. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58175-0_12
- [26] Huang J., *et al.*, "Degradation Mechanisms of Mid-power White-Light LEDs", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 381-432. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_14. Disponible en: https://books.google.com.cn/books?id=ba4sDwAAQBAJ&pg=PA381&lpq=PA381&dq=doi%3A%2010.1007/978-3-319-58175-0_14&source=bl&ots=NInihgPqyT&sig=ACfU3U1Fkc4P1PFy92GignDkTAU7aMo-vQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewi86Pe_udD4AhXtrmoFHdy_BKYQ6AF6BAGCEAM#v=onepage&q=doi%3A%2010.1007%2F978-3-319-58175-0_14&f=false
- [27] Lienig Jens and Matthias Thiele. "Fundamentals of Electromigration-Aware Integrated Circuit Design". [Consultado 12 de junio de 2022]. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-73558-0>
- [28] Yang H., B. Yang, J. Li, y P. Yang, "Failure analysis and reliability reinforcement on gold wire in high-power COB-LED under current and thermal shock combined loading", *Applied Thermal Engineering*, vol. 150, p. 1046-1053, mar. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.081. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431118337712>
- [29] Trivellin N., *et al.* "Failures of LEDs in Real-World Applications: A Review", *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 18, n. 3, p. 391-396, sep. 2018, doi: 10.1109/TDMR.2018.2852000. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8401693>
- [30] Cai M., *et al.*, "Effects of silicone lens aging on degradation kinetics of light-emitting diode package in various accelerated testing", *Optical Materials*, vol. 107, p. 110071, sep. 2020, doi: 10.1016/j.optmat.2020.110071. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925346720304146>
- [31] Fulmek P., *et al.* "On the impact of the temperature dependency of the phosphor quantum efficiency on correlated color temperature stability in phosphor converted LEDs», *Materials Chemistry and Physics*, vol. 196, p. 82-91, ago. 2017, doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.04.044. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058417303255>
- [32] Mehr M. Yazdan, *et al.* "Degradation of optical materials in solid-state lighting systems", *International Materials Reviews*, vol. 65, n. 2, p. 102-128, feb. 2020, doi: 10.1080/09506608.2019.1565716. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09506608.2019.1565716?scroll=top&needAccess=true>
- [33] Davis J. Lynn, *et al.* "Chromaticity Maintenance in LED Devices", en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 221-254. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_10. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58175-0_10
- [34] Narendran N., *et al.* "Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs", *Journal of Crystal Growth*, vol. 268, n. 3-4, p. 449-456, ago. 2004, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2004.04.071. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024804004907>
- [35] Allen S. C. y A. J. Steckl, "A nearly ideal phosphor-converted white light-emitting diode", *Applied Physics Letters*, vol. 92, n. 14, p. 143309, abr. 2008, doi: 10.1063/1.2901378. Disponible en: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2901378>
- [36] Khan T. Q., *et al.* "LED Lighting: Technology and Perception". John Wiley & Sons, 2015. p. 520. Disponible en: [https://www.wiley.com/en-us/LED+Lighting: +Technology+and+Perception-p-9783527412129](https://www.wiley.com/en-us/LED+Lighting%3A+Technology+and+Perception-p-9783527412129)
- [37] Yanagisawa T. y T. Kojima, "Long-term accelerated current operation of white light-emitting diodes", *Journal of Luminescence*, vol. 114, n. 1, p. 39-42, jul. 2005, doi: 10.1016/j.jlumin.2004.11.010. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022231304005186>
- [38] IES standards Committe, "ANSI/IES LM-80-20 – Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of LED Packages, Arrays, and Modules", 2020. [Consultado el 4 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://webstore.ansi.org/Standards/IESNA/ansiieslm8020>
- [39] Singh P. y C. M. Tan, "Time evolution of packaged LED lamp degradation in outdoor applications", *Optical Materials*, vol. 86, p. 148-154, dic. 2018, doi: 10.1016/j.optmat.2018.10.009. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925346718306864>
- [40] Nair G. B., H. C. Swart, y S. J. Dhoble. "A review on the advancements in phosphor-converted light emitting diodes (pc-LEDs): Phosphor synthesis, device fabrication and characterization". *Progress in Materials Science*, vol. 109, p. 100622, abr. 2020. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079642519301045>

- [41] Singh P. y C. M. Tan, ``Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the degradation process'', *Sci Rep*, vol. 6, n. 1, p. 1-13, abr. 2016, doi: 10.1038/srep24052. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/srep24052>
- [42] Becirovic V., *et al.* ``Effects on LEDs during the Accelerated Ageing Test», en *2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, mar. 2019, p. 1-6. doi: 10.1109/INFOTEH.2019.8717756. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8717756>
- [43] Ke H., *et al.*, ``Study on the chromaticity of LED lamps given by online test during accelerated aging under thermal stress'', *Optik*, vol. 164, p. 510-518, jul. 2018, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.02.120. Disponible en: <https://ps.booksc.eu/book/68809443/a92ee0>
- [44] Law T. K. y F. Lim, ``A Practical Degradation Based Method to Predict Long-Term Moisture Incursion and Color Change in High Power LEDs'', *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, n. 5, p. 1-14, oct. 2018, doi: 10.1109/JPHOT.2018.2869726. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8472891>
- [45] Fan J., *et al.*, ``Fatigue Damage Assessment of LED Chip Scale Packages with Finite Element Simulation'', en *2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, ago. 2018, p. 1642-1648. doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480748. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8480748>
- [46] Lu G., *et al.* ``LED-Based Luminaire Color Shift Acceleration and Prediction'', en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 201-219. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_9. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58175-0_9
- [47] Schuld M., W. D. van Driel, y B. Jacobs, ``Statistical Analysis of Lumen Depreciation for LED Packages'', en *Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems*, 2018, p. 487-502. doi: 10.1007/978-3-319-58175-0_17. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58175-0_17
- [48] X. Yang *et al.*, «An Alternative Lifetime Model for White Light Emitting Diodes under Thermal–Electrical Stresses», *Materials*, vol. 11, n.º 5, Art. n.º 5, may 2018, doi: 10.3390/ma11050817.
- [49] Huo J. *et al.* ``Efficient Energy Transfer from Trap Levels to Eu³⁺ Leads to Antithermal Quenching Effect in High-Power White Light-Emitting Diodes'', *Inorg. Chem.*, vol. 59, n. 20, pp. 15514-15525, oct. 2020. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.inorgchem.0c02541>
- [50] Gurskii A. L. y M. V. Masheda. ``Color and Spectral Characteristics of White Light Emitting Diodes and Their Variation During Aging''. *Доклады Белорусского Государственного Университета Информатики И Радиоэлектроники*, 2019, vol. S7, n. 125, [Consultado 11 de julio de 2022]. [En línea]. Disponible en: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41436965>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Diego de los Ángeles Fernández Labrada: <https://orcid.org/0000-0002-4240-7699>

Diseño de la investigación, recolección de datos. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo la revisión crítica de su contenido y la aprobación final.

Ernesto Alejandro Guerra Blanco: <https://orcid.org/0000-0002-9357-7807>

Redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido, revisión bibliográfica y la aprobación final.

Miguel Castro Fernández: <https://orcid.org/0000-0002-3983-469X>

Organización metodológica de la investigación. Redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y la aprobación final.

Alexander Céspedes Fernández: <https://orcid.org/0000-0002-4038-6652>

Redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y la aprobación final.